Estacionamiento Automático de un Vehículo Autoguiado usando Lógica Difusa

Nelson Acosta, *Claudio Aciti* y *Martín Berlusconi*
INTIA/INCA – Depto. Computación y Sistemas – Facultad de Ciencias Exactas
Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires
(7000) TANDIL – Argentina
Email: nacosta@exa.unicen.edu.ar
http:// www.exa.unicen.edu.ar/inca

Resumen:

El estacionamiento paralelo automático es una importante capacidad de un AGV (*automated guided vehicle*) tanto en aplicaciones militares como industriales o comerciales. El objetivo de este trabajo es el estudio y la aplicación de técnicas de control basadas en lógica difusa, para la materialización de un modulo dedicado al estacionamiento automático. Para este desarrollo se diseña un framework que permite modelar el comportamiento del vehículo, utilizando uno a escala 1/10 radio controlado por una PC.

Palabras Clave:

Vehículo Autoguiado, Lógica Difusa, Control, Estacionamiento Paralelo

I. Introducción.

El uso de diferentes tipos de vehículos ha aumentado en forma notable. Básicamente, un vehículo autoguiado es un móvil conducido por software, que conociendo o reconociendo el escenario puede moverse según sus necesidades evitando obstáculos con el fin de ejecutar tareas.

La necesidad de maximizar espacios, minimizar tiempos, acceder a zonas desconocidas o de alto riesgo son algunas de las razones por las que ha crecido la importancia de estos vehículos [1, 2, 3, 4]. La aplicación típica es el transporte público o privado [5, 6], de personas o carga; en proyectos científicos, militares o industriales se utilizan para la exploración y recolección de datos o de objetos. Normalmente son útiles en zonas de condiciones extremas (temperatura, presión, radiación, riesgo, entre otros).

Un vehículo autoguiado terrestre (AGV) puede realizar un número de tareas o acciones entre las cuales se destacan [7, 8, 9, 10, 11, 12]: seguir trayectos determinados, reconocer caminos, esquivar obstáculos, frenado automático y diversos tipos de estacionamientos [13, 14, 15, 16, 17].

El estacionamiento paralelo automático (PP, de *parallel parking*) es una importante capacidad de un AGV tanto en aplicaciones militares como industriales o comerciales. Puede usarse PP para que el vehículo se oculte entre árboles o en pequeños espacios, evitando ser localizado. Por otra parte, permite el transporte y almacenamiento (mientras no esté operativo) eficiente.

El objetivo de este trabajo es el estudio y la aplicación de técnicas de control basadas en lógica difusa, para la materialización de un modulo dedicado al estacionamiento automático en un AGV. La presentación es organizada por secciones, donde: 2) presenta el análisis del problema del PP, 3) muestra el sistema de control, 4) describe el sistema difuso de control implementado, 5) exhibe el modelo del framwork, y 6) expone las conclusiones y futuros trabajos.

II. Análisis del Problema.

Se supone un vehículo que se desplaza por una calle. El conductor decide estacionar en un espacio entre dos vehículos. Dichos vehículos se encuentran a una distancia suficiente para estacionar el AGV (normalmente, se consideran medidas superiores a 1.4 largos del vehículo) salvando sus restricciones ergonométricas.

Los pasos para realizar el estacionamiento del AGV son:

(a) Circula por la calle y selecciona un posible lugar para estacionar.
(b) Mide el espacio entre vehículos, pasando frente al área destino.
(c) Se detiene a la altura del vehículo estacionado más alejado de su trayectoria original.
(d) Retrocede acercándose paralelamente a la acera y al vehículo posterior.
(e) Avanza ajustando la posición al medio del área.
(f) Finaliza cuando el vehículo esté estacionado en el espacio elegido, caso contrario repite los pasos (d) y (e) todas las veces que sean necesarios.

En la etapa actual del proyecto se estudia el estacionamiento considerando sólo la secuencia de pasos (a) hasta (d). Esta estrategia de PP supone que el estacionamiento se debe realizar en sólo un movimiento.

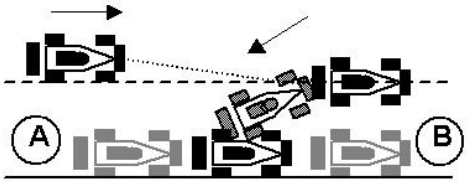

Fig. 1 - Serie de pasos para realizar el estacionamiento.

La Figura 1 muestra un diagrama del escenario donde se realiza el PP. El AGV circula paralelo a la acera, en sentido de izquierda a derecha. El área donde debe estacionar se encuentra entre los puntos A y B del gráfico. El vehículo realiza los pasos (a) a (f). Como restricciones generales se considera que no se debe tocar ningún vehículo en las maniobras, siendo las zonas de riesgo la parte delantera del vehículo con la parte trasera del vehículo que esta a su lado B y la parte trasera del vehículo con la delantera del vehículo de atrás A.

El vehículo a estudiar es del tipo 4 ruedas con dirección delantera. El sentido de sus movimientos es adelante/atrás (definido por la velocidad, positiva o negativa) y su dirección es derecha/izquierda (el ángulo al que puedan girar sus ruedas delanteras, positivo o negativo). El ángulo θ y las medidas del vehículo (Figura 2) restringen sus posibles movimientos.

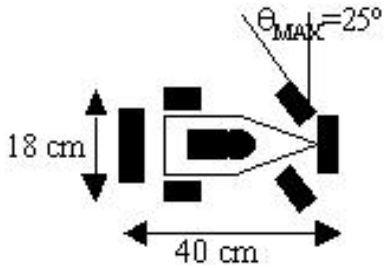

Fig. 2 - Descripción del vehículo.

El escenario está compuesto por dos vehículos estacionados y un área en la que el vehículo a estacionar realiza sus maniobras. Las características del área de estacionamiento son (Figura 3):

- Largo mínimo tres veces el largo del AGV (Fig. 3, distancia C).
- Ancho mínimo tres veces el ancho del AGV (Fig. 3, distancia D).
- El punto de inicio del área esta dado por la parte delantera del vehículo estacionado atrás AGV a estacionar (Fig. 3, punto B).
- La distancia mínima que deberá existir entre los dos vehículos estacionados es al menos un 1.4 veces el largo del AGV (Fig. 3, distancia C, entr4e A y B).

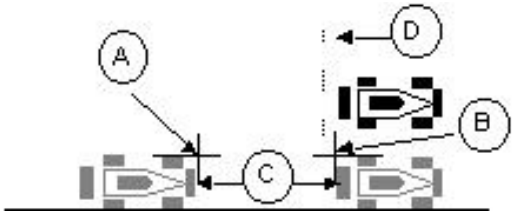

Fig. 3 - Descripción del escenario.

III. Sistema de Control.

Las variables de entrada del controlador hacen referencia a la posición del vehículo dentro del escenario. El par ordenado **(x, y)** indica la posición de la parte trasera central del vehículo, ϕ indica el ángulo que forma el centro longitudinal del vehículo con el eje horizontal (figura 4).

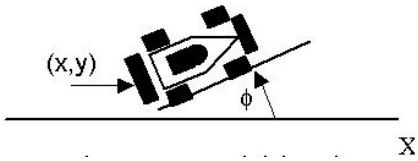

Fig. 4 - Variables de Entrada.

Las variables controladas (velocidad y dirección) representan la acción que debe llevar a cabo el vehículo en cada instante. Al realizar el estacionamiento el conductor ajusta la dirección del vehículo, por medio del volante, y la velocidad de desplazamiento, utilizando el acelerador, freno, embrague y las marchas.

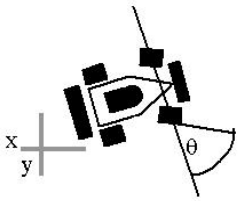

Fig. 5 - Variable de Salida.

La variable θ representa el ángulo que forman las ruedas delanteras respecto al centro longitudinal del vehículo (Figura 5). El rango de valores de esta variable es, $-\theta_{MIN} \leq \theta \leq \theta_{MAX}$, en este caso $-25 \leq \theta \leq 25$.

El sistema de control sigue una arquitectura jerárquica, donde el nivel superior controla el sentido y velocidad de desplazamiento del AGV, mientras que el ángulo de la dirección es determinado por un controlador difuso.

IV. Sistema Difuso.

Un sistema difuso mapea un conjunto de valores crisp de entrada en un conjunto crisp de salida. Internamente, los datos son fusificados según sus funciones de pertenencia, transformados por el motor de inferencia y finalmente defusificados. Se define el universo de discurso **U**, como un conjunto de 3-uplas ordenadas (**x**, **y**, **ϕ**). El conjunto U está formado por un producto cartesiano $\mathbf{U=X\times Y\times \Phi}$, donde $\mathbf{X=\{x|0\leq x<100\}}$ es el conjunto "*Posición Horizontal*", $\mathbf{Y=\{y|0\leq y<60\}}$, es el conjunto "*Posicion Vertical*" y $\mathbf{\Phi=\{\phi|-30\leq\phi\leq 90\}}$ es el conjunto "*Angulo*". Entonces se define $\mathbf{U=\{u|\ u=(x,y,\phi)}$, para $\mathbf{x\in X}$, $\mathbf{y\in Y}$, $\mathbf{\phi\in\Phi}$ }(Figura 6).

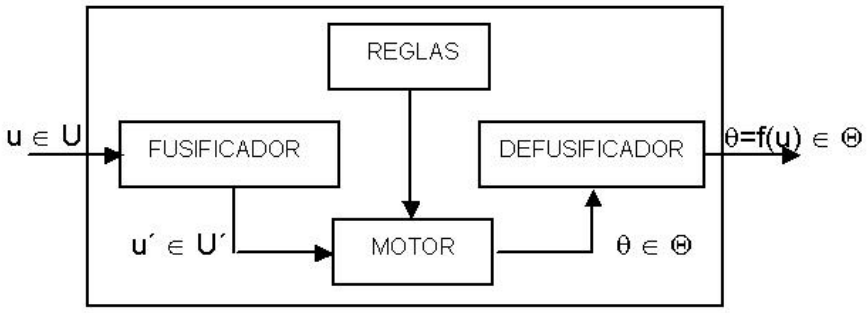

Fig. 6 - Sistema de Lógica Difusa basado en el modelo MAMDANI.

IV.a. Fusificador.

Fusificar un elemento es asignarle un grado de pertenencia para cada elemento de un conjunto difuso. El fusificador recibe como entrada un elemento $\mathbf{u=(x,y,\phi)\in U}$. Luego, para fusificar estos valores utiliza el conjunto difuso $\mathbf{U'=X'\times Y'\times \Phi'}$, donde **X', Y'** y **Φ'** son conjuntos difusos, los cuales se definen de la siguiente manera:

$$\mathbf{X'=\{(x'_1, x'_2, x'_3)\} \mid x'_i = (x, \mu_{X'i}(x))\}}$$
$$\mathbf{Y'=\{(y'_1, y'_2, y'_3)\} \mid y'_i =(y, \mu_{Y'i}(y))\}}$$
$$\mathbf{\Phi'=\{(\phi'_1, \phi'_2, \phi'_3 , \phi'_4 , \phi'_5)\} \mid \phi'_i=(\phi, \mu_{\Phi'i}(\phi))\}}$$

Las funciones de pertenencia de la variable **x** son (Figura 7): AD=Adentro, CE=Cerca y LE=Lejos. El vector resultante es $\mathbf{x'=(\mu_{AD}(x), \mu_{CE}(x), \mu_{LE}(x))}$.

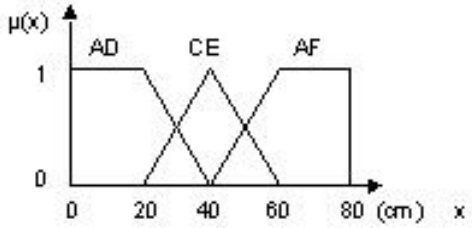

Fig. 7 - Funciones de Pertenencia de la variable de entrada **x**.

Las funciones de pertenencia de la variable **y** son (Figura 8): AL=Alta, ME=Media y BA=Baja. El vector resultante es $\mathbf{y'=(\mu_{BA}(y), \mu_{ME}(y), \mu_{AL}(y))}$.

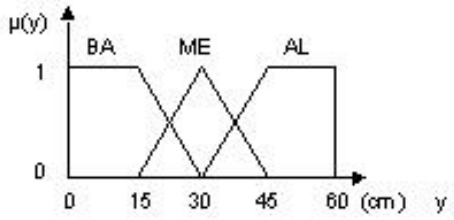

Fig. 8 - Funciones de pertenencia de la variable **y**.

El área de las funciones de pertenencia **x** e **y** se dividen en nueve secciones (Figura 9), con tres regiones horizontales para **y** (del tamaño del ancho de un AGV cada una); mientras que el dominio de **x** se divide en tres regiones verticales (de aproximadamente tres largos del AGV).

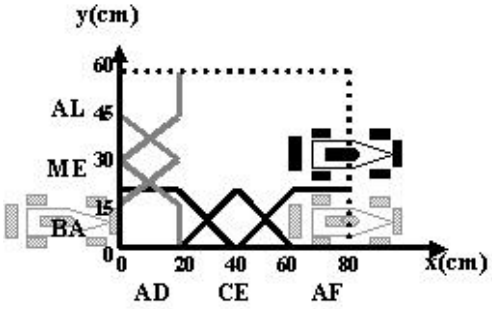

Fig. 9 - Representación de las funciones de pertenencia **x** e **y** en el escenario.

Las funciones de pertenencia de la variable ϕ (Figura 10) son: C=Cerrado, R=Recto, PA=Poco Abierto, A=Abierto y MA=Muy Abierto. El vector resultante es $\phi' = (\mu_C(\phi), \mu_R(\phi), \mu_{PA}(\phi), \mu_A(\phi), \mu_{MA}(\phi))$.

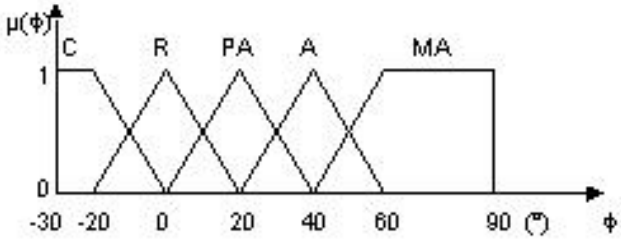

Fig. 10 - Funciones de pertenencia de la variable de entrada ϕ.

IV.b. Reglas.

El motor de inferencia difusa, utiliza las reglas de inferencia para calcular el vector con las salidas a defusificar. La representación de las reglas en notación IF-THEN es la siguiente: **IF x** = "*Posición x*" **AND y** ="*Posición y*" **AND** ϕ ="*Angulo*" **THEN** θ = "*Angulo Salida*". Las reglas de inferencia se describen en la Figura 11 donde cada casilla, intersección de un subconjunto en **X´** e **Y´** para un **Φ´** determinado, representa la salida del conjunto de salida **Θ**

$\phi = C$

	AD	CE	LE
AL	1 -	2 -	3 -
ME	4 -	5 -	6 MD
BA	7 MD	8 D	9 -

$\phi = R$

	AD	CE	LE
AL	10 -	11 -	12 MD
ME	13 -	14 MD	15 D
BA	16 M	17 I	18 -

$\phi = PA$

	AD	CE	LE
AL	19 -	20 MD	21 D
ME	22 -	23 D	24 M
BA	25 I	26 I	27 -

$\phi = A$

	AD	CE	LE
AL	28 -	29 -	30 -
ME	31 -	32 -	33 MD
BA	34 MD	35 D	36 -

$\phi = MA$

	AD	CE	LE
AL	37 -	38 -	39 MD
ME	40 -	41 MD	42 D
BA	43 M	44 I	45 -

Fig. 11 - Reglas del Motor de Inferencia.

Las reglas 9, 18, 27, 36, 45 no tienen consecuente ya que en esa posición se encuentra estacionado un vehículo. El resto de las reglas que no tienen consecuente es debido a que si el AGV se encuentra en esa situación no puede continuar con el estacionamiento. En consecuencia, el vehículo deberá reacomodarse o volver a un punto de partida.

IV.c. Defusificador.

El proceso de defusificación produce una salida crisp (θ) del conjunto difuso Θ'. Uno de los métodos más utilizados para defusificar es el "*centro de gravedad*", que usa como salida del sistema el centro de gravedad θ de Θ'. El "*centroide*", una simplificación del centro de gravedad, se ha seleccionado para su uso debido a su mínima carga computacional.

Las funciones de pertenencia de la variable θ (Figura 12) son: MI=Muy Izquierda, I=Izquierda, M=Medio, D=Derecha, y MD=Muy Derecha.

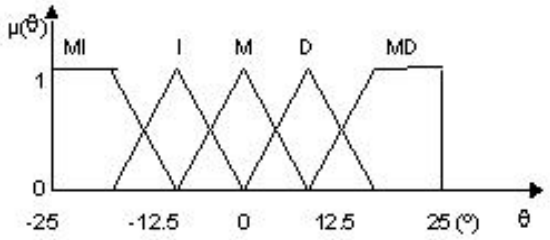

Fig. 12 - Funciones de pertenencia de la variable de salida θ.

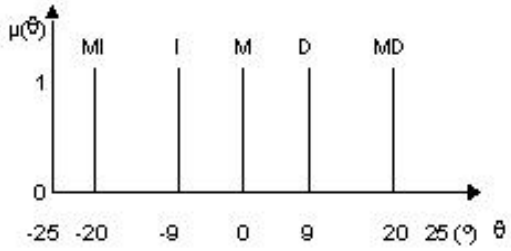

Fig. 13 - Singleton equivalente para θ.

V. Modelo utilizado en el estudio.

Los dispositivos utilizados en esta aplicación (Fig. 14) son: un vehículo a control remoto (escala 1/10), una adaptación del control remoto para su control por el puerto paralelo de una PC, una cámara y una PC. El AGV se alimenta con 9volts y 3volts y además tiene las siguientes dimensiones: longitud 390 mm, ancho 178 mm, diámetro de las ruedas 56 mm, ancho de las ruedas 33 mm, y ángulo de giro $-25° \leq \theta \leq 25°$. Es de destacar que las ruedas son inflables y de caucho blando lo que permite un buen coeficiente de fricción en casi cualquier superficie. El control remoto se alimenta con una batería de 9volts y brinda los siguientes comandos para la dirección: a derecha, a centro o a izquierda; mientras que la aceleración es hacia adelante, hacia atrás o detenido.

Fig. 14 – Algunas fotos del vehículo

Básicamente, la aplicación es un lazo de control (Figura 15). La cámara toma una foto del escenario, de la cual se obtienen los valores de las variables de entrada, **x**, **y** y ϕ Estas variables son los parámetros que recibe el controlador para calcular la variable de salida θ que es enviada al control remoto para que de la orden de la acción al vehículo.

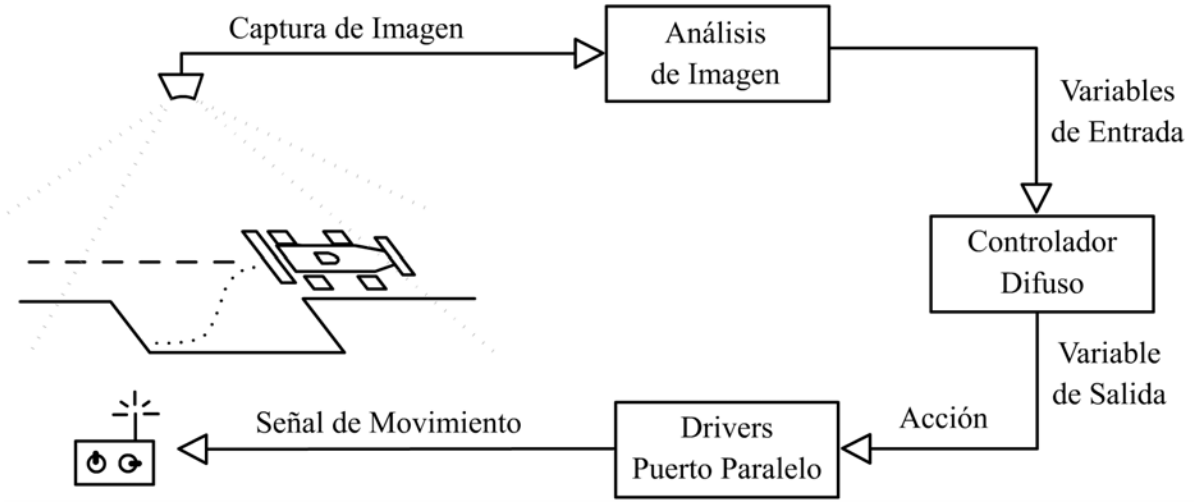

Fig. 15 - Esquema general.

Durante la inicialización del sistema se obtienen los parámetros estáticos del escenario (posición de los otros vehículos) y la posición inicial del AGV a estacionar. La posición del AGV es hallada para cada ciclo de ejecución del controlador, para lo cual se utiliza una red neuronal (compuesta por 72 neuronas) entrenada para localizar dos gráficos en los alerones (delantero y trasero) del AGV.

Todo el proyecto se ha implementado en Linux, usando la distribución de Rock-Linux básica a la cual se le ha modificado el núcleo a la versión 2.4 de Real-Time Linux (RTL). Se ha desarrollado un módulo para interfaz a la cámara y un módulo encargado de manejar las señales de control del AGV en tiempo real (por medio del puerto paralelo).

VI. Conclusiones y trabajos futuros.

El sistema realiza satisfactoriamente los estacionamientos paralelos automáticamente en un 73% de los casos probados. Obviamente las pruebas se han desarrollados teniendo en cuenta las áreas permitidas de inicio de las maniobras. Si bien el conjunto de reglas, presentadas en este artículo, funciona bastante bien, se están probando diferentes conjuntos de reglas y funciones de pertenencia sobre el mismo prototipo. El desempeño del sistema se ve degradado por la pobreza en los movimientos del control remoto utilizado (on/off); mas en líneas generales se ha desarrollado un framework adecuado y económico para la puesta a punto de algoritmos de control de AGV en escala 1/10.

Como futuros trabajos se pueden mencionar los siguientes:

a) Ajustar (o rediseñar) precisamente las funciones de pertenencia para estudiar las posibles mejoras en el desempeño del controlador.
b) Mejorar el comportamiento del AGV permitiendo linealidad en las posiciones de los servos, mediante técnicas de PWM (Pulse Wide Modulation, o modulación por ancho de pulso).
c) Se construirán otros vehículos con diferentes restricciones ergonometricas (diferentes dimensiones, tres ejes, orugas, etc.).
d) Se realizará un análisis de error más preciso utilizando para ello o un sensor láser o análisis de imágenes.

REFERENCIAS

[1] Constantin von Altrock. "*Fuzzy Logic in Automotive Engineering*", Circuit Cellar Ink, Issue 88, November 1997. Pp: 1-10.

[2] E. Aguirre y A. Gonzalez. "*Fuzzy behaviors for mobile robot navigation: design, coordination and fusion*". International Journal of Approximate Reasoning, Nro 25, Pp:225-289, 2000.

[3] Ming Cao y Ernest Hall. "*Fuzzy Logic Control for an Automated Guided Vehicle*", SPIE Conference on Performance and Control of Network Systems, Boston, USA, 1-6 Nov'98.

[4] P. Webb, C. Fayad y C. Breitenbach. "*The Integration of an Optimised Fuzzy Logic Navigation Algorithm into a Semi-Autonomous Robot Control System*", International Workshop on Recent Advances in Mobile Robots. June 29, 2000, Leicester, UK.

[5] L. Li, F.-Y. Wang, Guoling Shan y Qunzhi Zhou, "*Design of Tire Fault Observer Based on Estimation of Tire/Road Friction Conditions*", Automatica Sinica, 2003, Vol.29, (4).

[6] Majura F. Selekwa y Emmanuel G. Collins, Jr.. "*Intelligent Fuzzy Behaviour Robotics*", FCRAR 2003, Florida Conference on the Recent Advances in Robotics – 2003.

[7] D. Wang y F. Qi, "*Trajectory planning for a four-wheel-steering vehicle*", Proc. 2001 ICRA IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 4, 2001, 3320-3325.

[8] F.-Y. Wang, X. Wang, y L. Li, "*Design and Construction of a Digital Vehicle Proving Ground*". IEEE Intelligent Systems, 2003, Vol. 18, (2), 12-15.

[9] K. R. S. Kodagoda, W. S. Wijesoma, y E. K. Teoh. "*Fuzzy Speed and Steering Control of an AGV*", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 10, No. 1, Jan'02. Pp:112-121.

[10] Mark Leyden, Daniel Toal y Colin Flanagan. "*A Fuzzy Logic Based Navigation System for a Mobile Robot*", Automatisierungssymposium, Wismar, 1999.

[11] Reinhard Braunstingl, Pedro Sanz y Jose Manuel Ezkerra. "*Fuzzy Logic Wall Following of a Mobile Robot Based on the Concept of General Perception*", ICAR '95, 7th International Conference on Advanced Robotics, Sant Feliu de Guixols, Spain, Pp.367-376, Sep. 1995.

[12] T.M. Nguyen, J.W. Sinko y R.C. Galijan. "*Using differential carrier phase GPS to control automated vehicles*". Proc of the 40th Midwest Symposium on Circuits and Systems, Vol 1, pp 493 –496, 1998.

[13] Swee Meng Wong y Ming Xie. "*Vision Functions for the Guidance of Smart Vehicle*", Proc of the 9th Intern Conf on Advanced Robotics (ICAR), Tokyo, Japan, Oct 25-27 1999.

[14] W.A Daxwanger y G.K. Schmidt. "*Skill-based parking control using Neural and Fuzzy Networks*". IEEE Intern Conf. on Systems, Man and Cybernetics. Vol 2, pp 1659 –1664, 1995.

[15] C. Laugier y F. Thierry. "*Sensor-based control architecture for a car-like vehicle*". Proc of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems, Vol 1, pp 216 –222, 1998.

[16] Jin Xu, Guang Chen y Ming Xie. "*Vision-Guided Automatic Parking for Smart Car*", IV IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Dearborn, MI, USA, October 3-5, 2000.

[17] L. Li y F. Y. Wang. "*Parking Guidance System for Front Wheel Steering Vehicles Using Trajectory Generation*", IEEE 6th International Conference On Intelligent Transportation Systems, Shanghai, China, October 12-15, 2003.